

DOI: 10.20103/j.stxb.202209292774

宋丹鸿, 张雪妮, 杨继粉, 田景焯. 荒漠植物不同功能群性状特征及其与土壤环境的关系. 生态学报, 2023, 43(18): 7403-7411.

Song D H, Zhang X N, Yang J F, Tian J Y. Traits of different functional groups of desert plants and their relationship with soil environment. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7403-7411.

荒漠植物不同功能群性状特征及其与土壤环境的关系

宋丹鸿^{1,2,3}, 张雪妮^{1,2,3,*}, 杨继粉^{1,2,3}, 田景焯^{1,2,3}

1 新疆大学生态与环境学院, 乌鲁木齐 830017

2 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830017

3 新疆精河温带荒漠生态系统教育部野外科学观测研究站, 乌鲁木齐 830017

摘要: 研究不同功能群植物性状差异及其与土壤环境关系对于充分掌握植物的环境适应策略至关重要。以艾比湖流域为研究区, 利用荒漠植物的植物高度、叶片碳、氮、磷、硫、钾、钙、钠、镁含量等 9 个性状, 将高、低土壤水盐环境下的植物划分为 5 个功能群, 分析不同功能群的植物组成、性状差异及其与土壤环境的关系。结果表明: (1) 不同土壤水盐环境下, 其植物功能群组成不同; 其中白刺、胡杨和罗布麻在两个土壤水盐环境下的功能群中均存在。(2) 植物的功能性状在不同土壤水盐环境下也发生了适应性的变化。高土壤水盐环境下 3 个功能群的植物高度、叶片碳、氮、磷和钙含量显著高于低土壤水盐环境功能群 ($P < 0.05$); 低土壤水盐环境下 2 个功能群的植物叶片硫、钠和镁含量高于高土壤水盐环境功能群。(3) 土壤含水量 (SVWC)、电导率 (EC)、pH 以及土壤磷含量对荒漠植物功能性状影响较大。在高土壤水盐环境下, EC、pH 与植物高度, 叶片钾、钙含量正相关, 与叶片硫含量负相关; 在低土壤水盐环境下, SVWC、EC 与植物高度呈显著正相关 ($P < 0.05$)。研究有助于理解荒漠植物对极端环境的适应对策, 为保护荒漠地区生物多样性提供理论依据。

关键词: 植物功能性状; 功能群; 荒漠植物; 土壤水盐环境

Traits of different functional groups of desert plants and their relationship with soil environment

SONG Danhong^{1,2,3}, ZHANG Xueni^{1,2,3,*}, YANG Jifen^{1,2,3}, TIAN Jingye^{1,2,3}

1 College of Ecology and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830017, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology, Education Ministry, Urumqi 830017, China

3 Xinjiang Jinghe Observation and Research Station of Temperate Desert Ecosystem Ministry of Education, Urumqi 830017, China

Abstract: Grouping plant species sharing similar structure and function would increase our ability to predict vegetation dynamics and ecosystem function under natural or man-induced environmental changes at a global scale. At the same time, grouping plant species may provide some degrees of simplification to understand the ecological function of plants in key ecosystem processes. Studying differences in plant traits of different functional groups and their relationship with soil environment is crucial for fully grasping the environmental adaptation strategies of plants. However, meaningful variation in functional characteristics that might help group plants across narrow environmental gradients, such as those of arid ecosystems, were scarcely described. In this study, plants in high and low soil moisture and salinity environments in the Ebinur Lake Basin were divided into five functional groups according to nine morphological and chemical traits related to plant persistence and stress resistance, such as plant height and the contents of leaf carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, potassium, calcium, sodium, and magnesium. Besides, the plant composition, traits difference, and relationship with soil

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31700354)

收稿日期: 2022-09-29; 网络出版日期: 2023-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xnzhang@xju.edu.cn

environment of different functional groups were analyzed. The results showed that: (1) the composition of plant functional groups was different in different soil moisture and salinity environments; *Nitraria tangutorum*, *Populus euphratica*, and *Apocynum venetum* were detected in both environments. (2) Plant functional traits changed adaptively in high and low soil moisture and salinity environments. The plant height and leaf carbon, nitrogen, phosphorus, and calcium contents of three functional groups in the high soil moisture and salinity environment were significantly higher than those in the low soil moisture and salinity environment ($P < 0.05$); The contents of sulfur, sodium, and magnesium in leaves of two functional groups in the low soil moisture and salinity environment were higher than those in the high soil moisture and salinity environment. (3) Soil volume water content (SVWC), electrical conductivity (EC), pH, and soil phosphorus concentration had the greater impact on the functional traits of desert plants. In the high soil moisture and salinity environment, soil EC and pH were positively correlated with plant height and leaf potassium and calcium contents, while negatively correlated with leaf sulfur content. In the low soil moisture and salinity environment, SVWC and EC were significantly positively correlated with plant height ($P < 0.05$). The study helps to understand the adaptation responses of desert plants to the extreme environments and provides a theoretical basis for the conservation of biodiversity in desert areas.

Key Words: functional traits; functional groups; desert plant; soil water-salt environment

植物功能性状与土壤环境间的关系在生态学领域具有举足轻重的地位^[1-2]。更重要的是,通过将植物功能性状与环境胁迫相联系,能够更准确对功能群进行划分^[3]。功能群的变化是多因素共同作用的结果,其中干旱、火灾、放牧等外部环境因素都会充当环境过滤器^[4-6],在环境过滤器作用下的群落通常会出现具有相似功能性状的几组功能群^[6-8]。如荒漠植物功能性状的自我调节机制促使其叶片在旱胁迫和盐胁迫环境下呈现出相似的适应特征^[9-10]。不同功能型植物的营养利用和存储策略不同,导致其功能性状差异明显,表明它们对环境的耐受度和对环境的需求也不同^[11]。因此,从植物功能群角度分析植物功能性状差异及其与土壤环境间关系有助于更充分理解植物对环境的适应策略及其在生态系统中的功能,为维持植物多样性提供理论参考。

研究植物功能群与环境的关系对揭示植物的环境适应机制、群落构建机制、预测植被变化等具有重要的作用^[12],尤其是在气候干旱、土壤贫瘠的荒漠地区。通过研究不同植物功能群的功能性状特征及其与土壤环境间的关系,可以对胁迫环境下植物的适应机制进行更深的认识。近年来,关于植物功能群的研究主要集中在生物多样性与生态系统功能^[13-14]、功能群划分与环境因子的动态关系^[12,15]、功能群对干扰的响应^[16-17]等方面。在这些研究中,关于森林和草原生态系统功能群的较多^[18],但对极端干旱区荒漠植物功能群的研究较少,且功能群与不同环境因子之间的关系还有待进一步研究^[19]。

本研究选择艾比湖湿地国家级自然保护区为研究区,其位于新疆北部准噶尔盆地荒漠区,分布有典型的荒漠植物群落。研究区内干旱、盐渍化等胁迫环境对植物形态、化学性状等有强烈影响^[19],因而认为在不同的土壤水盐环境下可能会形成特定的植物功能群。基于此,利用植物的形态化学功能性状进行功能群划分,对不同水盐环境下的功能群组成,以及功能性状对胁迫环境的响应等进行研究。拟回答以下问题:在两种不同的胁迫环境下,1)不同植物功能群的性状有何差异? 2)各功能群与环境间有何关系及其随土壤水盐环境有何改变?

1 研究区概况和方法

1.1 研究区概况

艾比湖湿地国家级自然保护区(44°30'—45°09'N, 82°36'—83°50'E)位于新疆博尔塔拉蒙古自治州精河县境内,地处准噶尔盆地西南缘最低洼地和水盐汇集中心^[20]。该地区日照充足,降水稀少,但蒸发率较高,多大风天气,盐尘和浮尘活动频繁^[21-22];研究区内的阿其克苏河位于湖区东侧,是艾比湖的水源之一。前期研

究表明,河岸土壤水分和盐分含量较高,并随着离河距离增加逐渐降低,土壤环境距河距离的不同表现出的这种差异也直接影响了植物的空间分布变化^[23]。艾比湖特殊的生态环境孕育着独特的荒漠植物资源,其中,乔木主要有多枝柽柳(*Tamarix ramosissima*)、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、胡杨(*Populus euphratica*)等;灌木主要为花花柴(*Karelinia capsica*)、罗布麻(*Apocynum venetum*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、木碱蓬(*Suaeda salsa*)、琵琶柴(*Reaumuria songarica*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、盐豆木(*Halimodendron halodendron*)、盐穗木(*Halostachys capsica*)、盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)、刺沙蓬(*Salsola ruthenica*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、对节刺(*Horaninowia ulicina*);草本有芦苇(*Phragmites australis*)、平卧碱蓬(*Suaeda prostrata*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、小叶碱蓬(*Suaeda microphylla*)、露果猪毛菜(*Salsola aperta*)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)等。近年来,由于人类活动和气候变化的影响,阿其克苏河几近干涸,环境胁迫增强,河岸植被面临退化威胁^[21]。探究植物在不同水盐环境下的功能群组成及其环境适应策略,有助于该区植被恢复过程中的物种选择和群落构建^[24]。

1.2 研究方法

1.2.1 调查与实验分析

垂直于阿其克苏河设置三条长 5 km 的样带,相邻样带间隔 5 km。在样带上隔 500 m 设置一个 10 m×10 m 的样方,共 32 个样方。于植物生长季内进行野外调查和采样,调查过程中记录样方位置、物种数、多度和植株高度。采集样方中每株健康植物的叶片带回实验室后于 75 °C 的烘箱中烘干 48 h,将叶片样品研磨粉碎并过筛,用于测定碳、氮、磷、硫、钾、钠、镁、钙指标。样方调查前,在样方裸地任意五点取 0—15 cm 的土壤样品,混合均匀,土壤样品采集后放入自封袋中,带回实验室,土壤 pH 值利用酸碱计法测定,采用烘干称重法、电导法测定土壤含水量(SVWC)和含盐量(EC)。各指标实验方法为:土壤和植物叶片有机碳的测定采用重铬酸钾稀释热法,土壤(H₂SO₄-混合加速剂消煮)和植物叶片全氮(H₂SO₄-H₂O₂消煮)的测定采用凯氏定氮法,土壤全磷的测定采用 HClO₄-H₂SO₄钼锑抗比色法,叶片全磷的测定采用 H₂SO₄-H₂O₂消煮-钼锑抗比色法,叶片钾、钠、镁、钙含量用原子吸收光谱法,具体实验方法参考文献^[25-26]。

1.2.2 数据分析

将所有样方通过聚类分析(类平均法)来划分为高、低水盐环境两组,并对高、低土壤水盐环境的土壤理化性质进行单因素方差分析,发现由高土壤水盐到低土壤水盐环境,土壤水分、电导率显著降低(高土壤水盐环境,SVWC:16.50%,EC:12.20 ds/m;低水盐环境,SVWC:2.63%,EC:1.91 ds/m)^[21]。在不同土壤水盐梯度下根据植物性状指标划分,有利于准确划分不同层次功能群,以便更好理解植物功能群对环境适应的共性规律。对不同土壤水盐环境下的植物形态性状(高度)及叶片化学性状(碳、氮、磷、硫、钾、钙、钠、镁)用 Z 得分数据转化法进行数据标准化,利用欧几里得距离和算术平均非加权聚类分析。该方法根据单个植物性状识别植物功能群,而与生长形式无关,被广泛用于生态学研究^[27-28]。分析前对性状进行对数转换,由于数据不满足正态性和方差齐性前提,采用非参数方法(Kruskal-Wallis 法)比较不同土壤水盐环境下五个植物功能群之间的性状差异。利用冗余分析解析不同土壤环境因素对各功能群植物性状的影响,并通过层次分割(radca.hp)区分各个环境变量单独的贡献^[29]。数据的整理与统计分析通过 Excel 2016, R 4.1.0 软件完成,并通过 Origin 2018, Canoco 5.0 软件完成绘图。

2 结果与分析

2.1 不同土壤水盐环境下植物功能群组成

本次调查到的植物共有 25 种,其中高土壤水盐环境有 17 种,低土壤水盐环境有 17 种,两环境共有植物 9 种。对植物功能性状进行聚类分析,将研究区高土壤水盐环境下植物划分为 3 个功能群(HFG1, HFG2, HFG3),低土壤水盐环境下植物划分为 2 个功能群(LFG4, LFG5)(表 1)。其中 HFG1 由草本植物平卧碱蓬、小叶碱蓬,灌木植物白刺、盐爪爪、盐穗木,以及乔木植物梭梭组成;HFG2 包含草本植物甘草、芦苇,乔木植物

胡杨、柽柳以及盐豆木、白刺、琵琶柴等 8 种灌木植物;HFG3 仅包含胡杨。LFG4 由草本植物露果猪毛菜、沙蓬、芦苇,以及白刺、琵琶柴、对节刺、罗布麻等 9 种灌木植物及乔木植物梭梭、胡杨、柽柳组成。LFG5 仅由草本植物露果猪毛菜与灌木植物木碱蓬组成。

表 1 不同水盐环境下的植物功能群组成

Table 1 Composition of plant functional types in different soil water and salinity environment

土壤水盐环境 Soil water and salinity environments	植物功能群 Plant functional groups	物种 Species		
		草本 Herb	灌木 Shurb	乔木 Macrophanerophytes
高土壤水盐环境 High soil water and salinity environment	HFG1	平卧碱蓬(<i>Suaeda prostrata</i>)、小叶碱蓬(<i>Suaeda microphylla</i>)	白刺(<i>Nitraria tangutorum</i>)、盐爪爪(<i>Kalidium foliatum</i>)、盐穗木(<i>Halostachys caspica</i>)	梭梭(<i>Haloxylon ammodendron</i>)
	HFG2	甘草(<i>Glycyrrhiza uralensis</i>)、芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	盐豆木(<i>Halimodendron halodendron</i>)、白刺(<i>Nitraria tangutorum</i>)、琵琶柴(<i>Reaumuria songarica</i>)、骆驼刺(<i>Alhagi sparsifolia</i>)、盐穗木(<i>Halostachys caspica</i>)、罗布麻(<i>Apocynum venetum</i>)、花花柴(<i>Karelinia caspica</i>)、盐节木(<i>Halocnemum strobilaceum</i>)	柽柳(<i>Tamarix ramosissima</i>)、胡杨(<i>Populus euphratica</i>)
	HFG3	—	—	胡杨(<i>Populus euphratica</i>)
低土壤水盐环境 Low soil water and salinity environment	LFG4	露果猪毛菜(<i>Salsola aperta</i>)、沙蓬(<i>Agriophyllum squarrosum</i>)、芦苇(<i>Phragmites australis</i>)	盐爪爪(<i>Kalidium foliatum</i>)、盐节木(<i>Halocnemum strobilaceum</i>)、木碱蓬(<i>Suaeda salsa</i>)、白刺(<i>Nitraria tangutorum</i>)、琵琶柴(<i>Reaumuria songarica</i>)、对节刺(<i>Horaninovia ulicina</i>)、罗布麻(<i>Apocynum venetum</i>)、骆驼刺(<i>Alhagi sparsifolia</i>)、沙拐枣(<i>Calligonum mongolicum</i>)、刺沙蓬(<i>Salsola ruthenica</i>)	梭梭(<i>Haloxylon ammodendron</i>)、胡杨(<i>Populus euphratica</i>)、柽柳(<i>Tamarix ramosissima</i>)
	LFG5	猪毛菜(<i>Salsola collina</i>)	木碱蓬(<i>Suaeda salsa</i>)	—

2.2 不同水盐环境下各植物功能群的性状差异

在不同水盐环境下 5 个功能群功能性状存在明显差异(图 1)。在各功能群中,HFG3 中植物的高度、叶片碳、氮、磷和钙含量显著高于其他功能群,叶片硫、钠含量显著低于其他功能群;LFG5 中植物的叶片硫、钾、钠含量显著高于其他功能群,高度、叶片碳、钙、镁含量显著低于其他功能群($P < 0.05$)。HFG2 中植物的叶片钾含量显著低于其他功能群;功能群 LFG4 的叶片镁含量显著高于其他各个功能群,且其他各个功能群叶片镁含量无显著差异($P > 0.05$)。除 HFG3 外,其他各个功能群叶片磷含量无显著差异($P > 0.05$)。与低土壤水盐环境相比,高土壤水盐环境下的植物高度,叶片碳、氮、磷、钙含量显著较高,而叶片钠、镁含量显著较低($P < 0.05$)。

2.3 不同水盐环境下各植物功能群性状与土壤环境因子的关系

冗余分析结果表明(图 2),在高土壤水盐环境下,前两个排序轴共解释了 HFG1、HFG2 及 HFG3 功能性状与土壤环境因子间关系的 91.67%、96.52%、99.42%;在低土壤水盐环境下,LFG4、LFG5 前两轴的解释率分别为 91.67%、95.79%。HFG1、HFG2 中的植物叶片碳、硫、钠、镁含量与土壤环境相关性较大,其中,叶片碳、硫、钠含量与土壤环境有较高的负相关;叶片镁含量与环境因子表现出较高的正相关。土壤环境因子对 HFG3、LFG5 功能性状的改变影响较大。LFG4 的植物高度,叶片钙、钠含量受土壤环境因子影响较大。土壤含水量、电导以及有机碳含量与高度呈显著正相关。

从环境变量的单独解释率来看(表 2),土壤 EC、P 对 HFG1 功能性状的影响较大,解释率分别达到 31.49%、25.41%;对于 HFG2 功能性状,土壤 pH、P、EC 的单独解释率分别为 38.72%、6.92%、9.70%;在 HFG3 土壤 SVWC 的单独解释率为 19.42%。LFG4、LFG5 的功能性状受土壤 EC、SVWC 影响较大,解释率分别为 3.34%、3.81%、19.59%、12.92%。

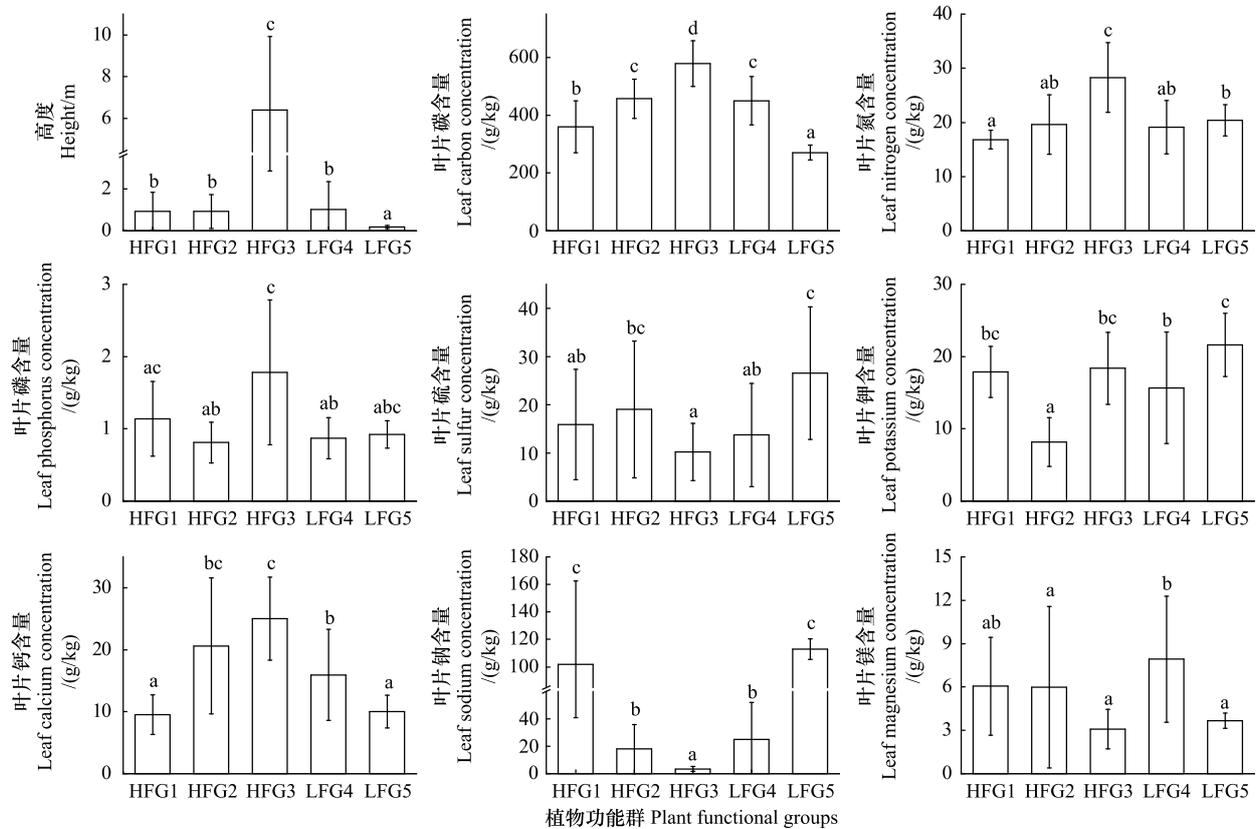


图 1 不同水盐环境下各植物功能群的性状差异

Fig.1 Functional traits difference of plant functional groups in different soil water and salinity environment

不同字母表示不同功能群间性状存在显著差异 ($P < 0.05$)

表 2 不同水盐植物功能群与土壤因子冗余分析(RDA)中的环境变量单独解释率

Table 2 The independent explanation of the soil factors in RDA ordination in different soil moisture and salinity

土壤水盐环境 Soil water and salinity environment	功能群 Functional groups	土壤酸碱度 Soil pH	电导率 Electrical conductivity	土壤含水量 Soil volume water concentration	土壤有机碳含量 Soil organic carbon concentration	土壤氮含量 Soil nitrogen concentration	土壤磷含量 Soil phosphorus concentration	土壤硫含量 Soil sulfur concentration
高土壤水盐环境 High soil water and salinity environment	HFG1	6.29%	31.49%	7.29%	8.56%	7.97%	25.41%	5.78%
	HFG2	38.72%	9.70%	2.37%	7.67%	5.23%	6.92%	2.62%
	HFG3	18.82%	12.78%	19.42%	13.89%	14.96%	15.85%	4.29%
低土壤水盐环境 Low soil water and salinity environment	LFG4	0.85%	3.34%	3.81%	1.43%	0.97%	3.49%	2.18%
	LFG5	7.28%	19.59%	12.92%	6.82%	3.08%	14.80%	8.55%

3 讨论

3.1 不同土壤水盐环境对功能群组成的影响

植物功能群是研究植物随环境因子变化的基本单元,功能类群的重组可以帮助植物来适应复杂多变的环境^[30]。本研究中各功能群组成在不同土壤水盐环境下的变化与此观点基本一致。不同土壤水盐环境下植物面临的水盐胁迫或养分限制的不同,因此其形成的功能群组成也有差异。从高水盐到低水盐环境,土壤盐分、含水量, pH 和养分降低,功能群组成随之改变。这符合李玉霞^[31]提出的在相似的气候条件下,土壤理化性质

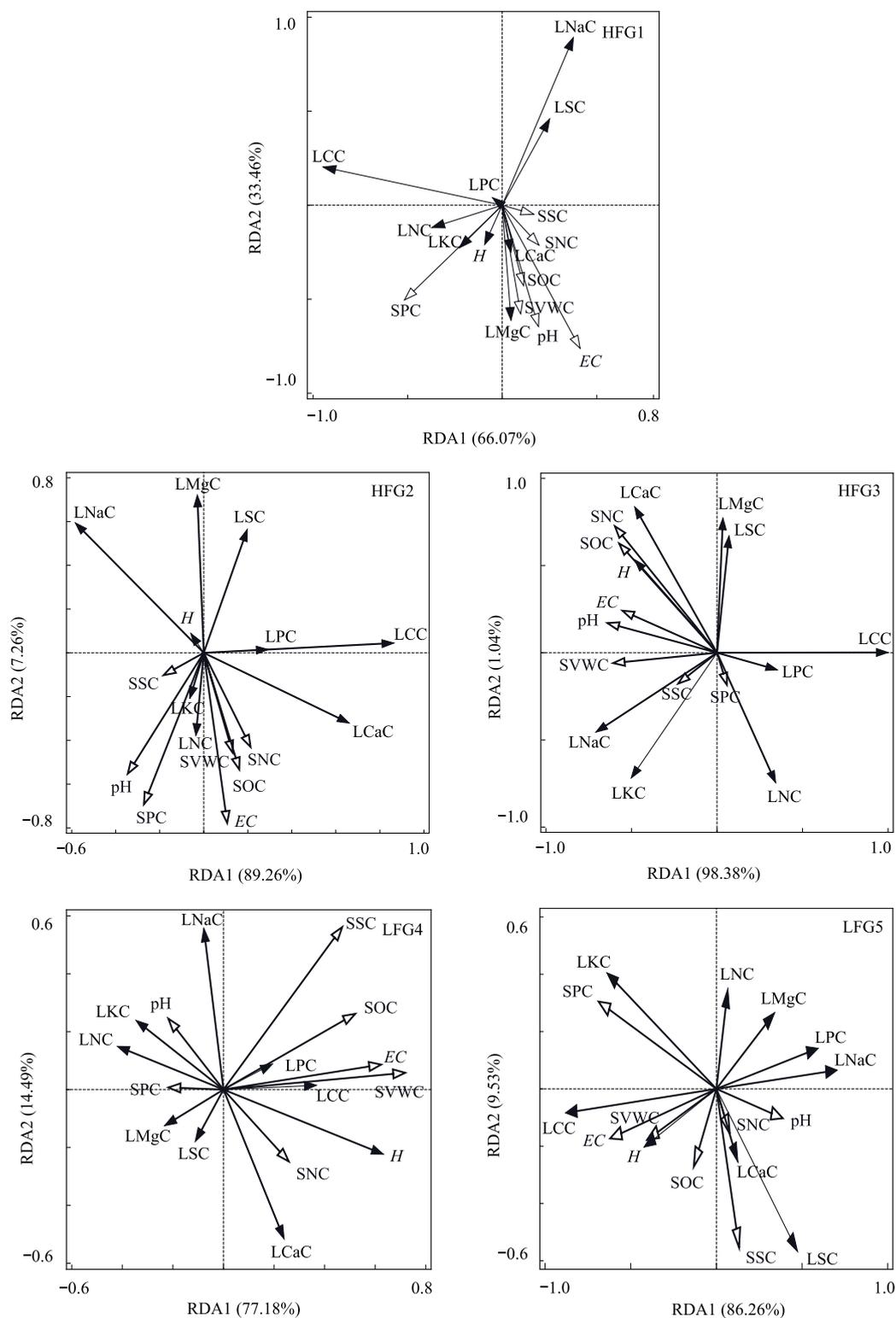


图2 不同水盐环境各功能群性状指标与土壤理化因子的 RDA 分析

Fig.2 A biplot for redundancy analysis showing the relationships between plant traits of functional groups and soil factors in different soil moisture and salinity

实心箭头代表功能群性状;H:高度 height;LCC:叶片碳含量 leaf carbon concentration;LNC:叶片氮含量 leaf nitrogen concentration;LPC:叶片磷含量 leaf phosphorus concentration;LSC:叶片硫含量 leaf sulfur concentration;LKC:叶片钾含量 leaf potassium concentration;LCaC:叶片钙含量 leaf calcium concentration;LNaC:叶片钠含量 leaf sodium concentration;LMgC:叶片镁含量 leaf magnesium concentration;虚线箭头代表土壤因子;pH:土壤酸碱度 soil pH;SVWC:土壤含水量 soil volume water concentration;EC:电导率 electrical conductivity;SOC:土壤有机碳含量 soil organic carbon concentration;SNC:土壤氮含量 soil nitrogen concentration;SPC:土壤磷含量 soil phosphorus concentration;SSC:土壤硫含量 soil sulfur concentration

的空间差异决定了植被分布空间的差异,也与不同的物种对环境具有不同的生态适应性,物种组成会随着环境梯度的变化而改变有关^[32-33]。在本研究区中,不同的胁迫生境条件影响了荒漠植物的分布范围,导致了各功能群由不同的物种组成。然而,白刺、盐爪爪、盐穗木和琵琶柴等在 HFG2, LFG5 中均有出现,表明这些植物在不同土壤水盐环境下分布比较均匀,这可能说明其生态位宽度大,对研究区的环境适应性强^[9],这与柴达木盆地荒漠植物生态位特征讨论一致^[33]。

3.2 植物功能群功能性状对不同水盐变化的响应规律

有研究表明土壤水盐变化对艾比湖流域植物群落水平的功能性状有不同程度的影响^[34],本研究发现不同水盐环境下的植物功能群间功能性状存在显著差异,体现了不同功能群植物对干旱生境的适应策略不同,这与 Simova 等^[35]研究结果一致。从高土壤水盐到低土壤水盐环境,环境因子发生了显著变化,水盐和养分含量均下降,土壤变的贫瘠。高土壤水盐环境中 3 个功能群的植物高度、叶片碳、氮、磷和钙含量显著高于低土壤水盐的 2 个功能群。另外,发现同一物种在高土壤水盐环境下的植物高度显著高于低土壤水盐环境,认为相对于低土壤水盐环境来说,高土壤水盐环境可能更适合植物生长,也反应了株高与耐受或避免环境胁迫的能力有关^[36-38]。在低土壤水盐环境下,叶片碳和钙含量较少,可能是由于在干旱胁迫加剧的条件下荒漠植物光合作用受到一定的阻碍,进而导致低土壤水盐环境中功能群植物的碳水化合物合成减少^[39]。低土壤水盐环境下的 2 个功能群植物叶片硫、钾、钠、镁含量高于高土壤水盐环境,根据植物体内的硫、钾、钠和镁水平与植物对水胁迫、盐胁迫等的抗逆性紧密相关^[19],认为植物 LFG4、LFG5 可能为适应更干旱的生境条件而提高了抗逆性。HFG3 仅由胡杨组成,其高度、叶片碳、氮、磷、钾、钙含量显著高于其他功能群,而叶片硫、钾、钠、镁含量显著低于其他功能群,这与胡杨对盐碱、高温和干旱等极端环境条件具有很强的耐性和抗性有关^[40]。在轻度胁迫下,胡杨会通过渗透调节,减轻胁迫对植物造成的伤害,从而为胡杨恢复健康生长提供必要的物质基础^[41]。

3.3 环境因子对植物功能性状的影响

在干旱荒漠地区,生长在极端恶劣环境下的植物通过调整性状特征来增强自身对干旱、盐碱等多重胁迫的综合适应能力,这是植物生存策略变化的体现^[42-43]。土壤是植物生长的基础。理论上,土壤异质性越高,植物性状的异质性越高^[44]。在局部或小尺度上,土壤因子决定了性状的分布^[42],因此,植物功能性状通常受土壤 pH、水分、盐分、养分等环境因子的显著影响。在本研究中影响艾比湖植物功能性状的环境因子主要是土壤 pH、SVWC、EC、P。低土壤水盐环境的 2 个功能群以及高土壤水盐环境下的 HFG2,土壤 pH 与植物高度呈负相关,这与大多数研究一致,认为土壤酸碱度与植物生长紧密相关^[45],其高度均是随着 pH 的增加呈下降趋势^[46],这可能是由于植物在盐碱胁迫耐受范围内,土壤 pH 可能对植物根系产生抑制作用,限制植物的生长^[47]。而两者的关系在高土壤水盐环境下 HFG1、HFG3 反之。在高土壤水盐环境下的 HFG1、HFG3 以及低土壤水盐环境下的功能群其高度与土壤 SVWC、EC 成正比。在干旱区,土壤含水量及其盐渍化对植物的生长具有直接影响^[48],而对于高土壤水盐环境下的 HFG2 来说,相对较高的土壤含水量和盐渍化程度容易对植物产生盐胁迫,从而造成植物的生理性干旱,影响植物的生长发育^[49]。土壤 SVWC、EC 对叶片碳含量影响较大,这与张雪妮^[50]对荒漠植物群落演替及其营养元素驱动研究中所得出的结论相反,这可能由于荒漠植物对不同盐渍化生境的特殊适应有关。土壤 SVWC、EC 与低土壤水盐功能群荒漠植物叶片氮、钾、钠、镁含量呈负相关,表明植物群落为适应不同水盐生境条件而调整了生存策略。土壤氮含量和磷含量是陆地生态系统中最常见的植物生长限制性营养物质^[51],在本研究中土壤磷含量变化对这五个功能群均有较强的影响,可能由于在干旱区降水淋溶不足,土壤碳酸盐积累,土壤碱度增加,导致磷利用率低和生物氮循环受限^[52-53]。此外,鉴于磷比氮的利用能力与土壤水分的关系更为密切,沙漠土壤通常受到磷比氮更严重的限制^[52,54]。这与我国荒漠地区植被生长更容易受到磷限制的结论研究一致^[52]。

4 结论

本文基于 9 个植物功能性状为基础对艾比湖流域荒漠植物进行聚类分析,将高、低土壤水盐环境下的植

物划分为 5 个功能群。各功能群的植物组成不同,且白刺、胡杨、罗布麻在不同功能群均出现,说明这些物种的适应性相对较强,可为相似生境区域的植被恢复实践提供参考。不同功能群总体具有较显著的功能性状差异,反映了荒漠植物环境适应策略的不同;其中高土壤水盐环境下植物高度、叶片碳、氮、磷、钙含量显著高于低水盐环境,说明相对高的土壤水分条件对于植物生长和营养状态具有显著的积极作用;低土壤水盐环境下植物叶片硫、钠、镁含量高于高土壤水盐环境功能群,可能是植物对加剧的土壤干旱、贫瘠的适应和表现。影响艾比湖荒漠植物各功能群功能性状的主要土壤因子依次为 pH、SVWC、EC、P,即土壤水分、盐碱性和土壤磷含量是决定荒漠植物适应策略的关键因子。

参考文献(References):

- [1] Yudina P K, Ivanov L A, Ronzhina D A, Anenkhonov O A, Ivanova L A. Influence of the systematic position at the family level on the leaf functional traits of steppe plants. *Contemporary Problems of Ecology*, 2020, 13(5): 533-544.
- [2] 朱蔚娜, 张国龙, 张璞进, 张迁迁, 任瑾涛, 徐步云, 清华. 大针茅草原 6 种主要植物叶凋落物和根系分解特征与功能性状的关系. *植物生态学报*, 2021, 45(6): 606-616.
- [3] Semenova G V, van der Maarel E. Plant functional types: a strategic perspective. *Journal of Vegetation Science*, 2000, 11(6): 917-922.
- [4] Diaz S, Cabido M, Casanoves F. Plant functional traits and environmental filters at a regional scale. *Journal of Vegetation Science*, 1998, 9(1): 113-122.
- [5] Cheng X Q, Ping T N, Li Z Z, Wang T, Han H R, Epstein H E. Effects of environmental factors on plant functional traits across different plant life forms in a temperate forest ecosystem. *New Forests*, 2022, 53(1): 125-142.
- [6] Pausas J G, Verdú M. Fire reduces morphospace occupation in plant communities. *Ecology*, 2008, 89(8): 2181-2186.
- [7] Cornwell W K, Schwikl D W, Ackerly D D. A trait-based test for habitat filtering: convex hull volume. *Ecology*, 2006, 87(6): 1465-1471.
- [8] Silva I A, Batalha M A. Woody plant species co-occurrence in Brazilian savannas under different fire frequencies. *Acta Oecologica*, 2010, 36(1): 85-91.
- [9] Bär Lamas M I, Carrera A L, Bertiller M B. Meaningful traits for grouping plant species across arid ecosystems. *Journal of Plant Research*, 2016, 129(3): 449-461.
- [10] 李磊, 张盟, 郑俊鸣, 荣俊冬, 林艺煌, 郑郁善. 滨海沙地 8 个竹种枝叶功能性状特征. *森林与环境学报*, 2022, 42(4): 354-363.
- [11] Cadotte M W, Carscadden K, Mirotnick N. Beyond species: functional diversity and the maintenance of ecological processes and services. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 48(5): 1079-1087.
- [12] 赵连春, 秦爱忠, 赵成章, 段凯祥, 王继伟, 文军. 嘉峪关草湖湿地植物功能群组成及其性状对不同生境的响应. *生态学报*, 2020, 40(3): 822-833.
- [13] 姜林. 植物功能群去除对高寒草甸生态系统功能的影响及其机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [14] 姜林, 胡骥, 杨振安, 詹伟, 赵川, 朱单, 何奕忻, 陈槐, 彭长辉. 植物功能群去除对高寒草甸群落结构、多样性及生产力的影响. *生态学报*, 2021, 41(4): 1402-1411.
- [15] Moradi H, Attar F, Oldeland J. Plant functional type approach for a functional interpretation of altitudinal vegetation zones in the Alborz Mts., Iran. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(11): 2257-2269.
- [16] 郑红玉, 刘秀梅. 巴里坤湿地植物功能群组成对退化程度的响应. *草学*, 2021, (5): 42-45.
- [17] 金超. 午潮山次生常绿阔叶林植物功能群划分及其对干扰的响应[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
- [18] 秦晓娟, 高璐, 邓永利, 秦浩, 董刚, 张峰. 山西平陆黄河湿地植物功能群划分. *山西大学学报: 自然科学版*, 2014, 37(3): 454-460.
- [19] 叶丽克·吐斯甫江, 张雪妮, 贡璐. 不同水盐环境下荒漠植物群落抗逆性化学性状的种间、种内变异. *生态学报*, 2021, 41(14): 5737-5746.
- [20] 李文华, 郭江平, 赵强. 新疆艾比湖荒漠生态保护区建设条件评价及规划. *中国沙漠*, 2000, 20(3): 278-282.
- [21] 张雪妮, 李岩, 杨晓东, 何学敏, 吕光辉. 荒漠植物叶片化学性状及其经济谱对水盐变化的响应. *生态学杂志*, 2018, 37(5): 1299-1306.
- [22] 程久菊, 张雪妮, 张子洋, 陈静. 艾比湖不同水盐环境荒漠植物种间关联格局下的叶片功能性状差异分析. *植物资源与环境学报*, 2022, 31(03): 18-25.
- [23] 张雪妮, 杨晓东, 吕光辉. 水盐梯度下荒漠植物多样性格局及其与土壤环境的关系. *生态学报*, 2016, 36(11): 3206-3215.
- [24] 杨玉婷, 曾鸿文, 温仲明, 王杨. 基于 LHS 策略的延河流域植物功能型划分. *西北林学院学报*, 2019, 34(02): 84-91.
- [25] 董鸣, 王义凤, 孔繁志. 陆地生物群落调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.

- [27] Belbin L, McDonald C. Comparing three classification strategies for use in ecology. *Journal of Vegetation Science*, 1993, 4(3): 341-348.
- [28] Leishman M R, Westoby M. Classifying plants into groups on the basis of associations of individual traits-evidence from Australian semi-arid woodlands. *Journal of Ecology*, 1992, 80(3): 417-424.
- [29] Lai J S, Zou Y, Zhang J L, Peres-Neto P R. Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analyses using the rdacca. hp R package. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, 13(4): 782-788.
- [30] 刘晓娟, 马克平. 植物功能性状研究进展. *中国科学: 生命科学*, 2015, 45(4): 325-339.
- [31] 李玉霞, 周华荣. 干旱区湿地景观植物群落与环境因子的关系. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(06): 43-49.
- [32] 卜文圣, 臧润国, 丁易, 张俊艳, 阮云泽. 海南岛热带低地雨林群落水平植物功能性状与环境因子相关性随演替阶段的变化. *生物多样性*, 2013, 21(3): 278-287.
- [33] 牛慧慧, 陈辉, 付阳, 杨伟, 张斯琦, 张博雄. 柴达木盆地东部荒漠植物生态位特征. *生态学报*, 2019, 39(8): 2862-2871.
- [34] 张雪妮, 李岩, 何学敏, 杨晓东, 吕光辉. 荒漠植物功能性状及其多样性对土壤水盐变化的响应. *生态学报*, 2019, 39(5): 1541-1550.
- [35] Šímová I, Violle C, Svenning J C, Kattge J, Engemann K, Sandel B, Peet R K, Wisser S K, Blonder B, McGill B J, Boyle B, Morueta - holme N, Kraft N J B, Van Bodegom P M, Gutiérrez A G, Bahn M, Ozinga W A, Tószögyová A, Enquist B J. Spatial patterns and climate relationships of major plant traits in the New World differ between woody and herbaceous species. *Journal of Biogeography*, 2018, 45(4): 895-916.
- [36] Jardim A V F, Batalha M A. Can we predict dispersal guilds based on the leaf-height-seed scheme in a disjunct cerrado woodland? *Brazilian Journal of Biology*, 2008, 68(3): 553-559.
- [37] Moles A T, Warton D I, Warman L, Swenson N G, Laffan S W, Zanne A E, Pitman A, Hemmings F A, Leishman M R. Global patterns in plant height. *Journal of Ecology*, 2009, 97(5): 923-932.
- [38] Westoby M. A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme. *Plant and Soil*, 1998, 199(2): 213-227.
- [39] 张珂, 何明珠, 李新荣, 谭会娟, 高艳红, 李刚, 韩国君, 吴杨杨. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征. *生态学报*, 2014, 34(22): 6538-6547.
- [40] Liu Y B, Li X R, Chen G X, Li M M, Liu M L, Liu D. Epidermal micromorphology and mesophyll structure of *Populus euphratica* heteromorphic leaves at different development stages. *PLoS One*, 2015, 10(9): e0137701.
- [41] Xu S J, An L Z, Feng H Y, Wang X L, Li X R. The seasonal effects of water stress on *Ammopiathus mongolicus* in a desert environment. *Journal of Arid Environments*, 2002, 51(3): 437-447.
- [42] 张睿, 刘华民, 寇欣, 徐智超, 于晓雯, 曹晓霁, 温璐, 马林芊, 王立新. 内蒙古高原湖滨湿地优势植物功能性状特征及其适应性. *生态学报*, 2022, 42(19): 7773-7784.
- [43] 夏曾润. 罗布麻适应盐、渗透胁迫和低钾的生理机制及分子基础初步研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- [44] Price J N, Gazol A, Tamme R, Hiiesalu I, Pärtel M. The functional assembly of experimental grasslands in relation to fertility and resource heterogeneity. *Functional Ecology*, 2014, 28(2): 509-519.
- [45] 赵彦坤, 张文胜, 王幼宁, 李科学, 贾会珍, 李霞. 高 pH 对植物生长发育的影响及其分子生物学研究进展. *中国生态农业学报*, 2008, 16(3): 783-787.
- [46] Wang C H, Lu M, Yang B, Yang Q, Zhang X D, Hara T, Li B. Effects of environmental gradients on the performances of four dominant plants in a Chinese saltmarsh: implications for plant zonation. *Ecological Research*, 2010, 25(2): 347-358.
- [47] 唐琨, 朱伟文, 周文新, 易镇邪, 屠乃美. 土壤 pH 对植物生长发育影响的研究进展. *作物研究*, 2013, 27(2): 207-212.
- [48] 张佳, 温仲明, 杨尚斌. 基于自然植被的延河流域生物量空间分布格局评估. *水土保持研究*, 2010, 17(3): 35-39.
- [49] 郭嘉, 李敬玉, 徐化凌, 许洁, 张明乾, 于一雷, 徐卫刚, 马牧源, 赵娜娜, 李肖夏, 朱耀军. 6 种典型滨海湿地植物对土壤盐分的影响. *水生态学杂志*, 2021, 42(3): 38-46.
- [50] 张雪妮. 荒漠植物群落演替及其营养元素驱动研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014.
- [51] Güsewell S N; P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [52] Luo Y, Chen Y, Peng Q W, Li K H, Mohammad A, Han W X. Nitrogen and phosphorus resorption of desert plants with various degree of propensity to salt in response to drought and saline stress. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107488.
- [53] Yang Y, Liu B R, An S S. Ecological stoichiometry in leaves, roots, litters and soil among different plant communities in a desertified region of Northern China. *Catena*, 2018, 166: 328-338.
- [54] Hu Y C, Schmidhalter U. Drought and salinity: a comparison of their effects on mineral nutrition of plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168(4): 541-549.